

Measuring dia. of particle moving through measurement vol.

Veröffentlichungsnr. (Sek.) DE19749233
Veröffentlichungsdatum : 1999-04-08
Erfinder : DAHL HOLGER (DE); WRIEDT THOMAS (DE)
Anmelder : DAHL HOLGER (DE); RHEIMS JOERG (DE)
Veröffentlichungsnummer : ☐ DE19749233
Aktenzeichen:
(EPIDOS-INPADOC-normiert) DE19971049233 19971107
Prioritätsaktenzeichen:
(EPIDOS-INPADOC-normiert) DE19971049233 19971107
Klassifikationssymbol (IPC) : G01N15/02; G01N15/14; G01P5/00; G01J3/12; G01B11/08
Klassifikationssymbol (EC) : G01P5/00D, G01N15/02B
Korrespondierende Patentschriften

Bibliographische Daten

The method for measuring the dia. of a particle is carried out, firstly producing an intensity pattern monochromatic polarized light from at least one angle spectrum of plane light waves. The measurement vol. is determined as at least one part of the region, in which the plane light waves intersect and form an intensity pattern. The light scattered by particles moving through the measurement vol. is detected by two detector units, aligned on the measurement vol. The frequency amplitude spectra of both detection signals are determined. With the determining of the phase difference (DELTA PHI) between both detection signals for those frequencies (f), which are located in a specified frequency range, and their amplitudes exceed a specified amplitude threshold value. The dia. of the particle is determined based on the course of the phase difference DELTA-PHI frequency f curve.

Daten aus der esp@cenet Datenbank - - I2



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Patentschrift
10 DE 197 49 233 C 1

51 Int. Cl.⁶:
G 01 N 15/02
G 01 N 15/14
G 01 P 5/00
G 01 J 3/12
G 01 B 11/08

21 Aktenzeichen: 197 49 233.9-52
22 Anmeldetag: 7. 11. 97
43 Offenlegungstag: -
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 8. 4. 99

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden.

73 Patentinhaber:
Dahl, Holger, 29355 Beedenbostel, DE; Rheims,
Jörg, 28211 Bremen, DE

74 Vertreter:
BOEHMERT & BOEHMERT, 28209 Bremen

72 Erfinder:
Dahl, Holger, 29355 Beedenbostel, DE; Wriedt,
Thomas, 28211 Bremen, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 43 26 979 C1
US 56 84 587
US 49 86 659
US 47 01 051

TROPEA, C., XU, T.-H., ONOFRI, F., GREHAN, G.,
HAUGEN, P., STIEGLMEIER, M.: "Dual-Mode Phase-
Doppler Anemometer" in: Part.Part.Syst.Charact.,
Vol. 13 (1996) S. 165-170;
TROPEA, C., XU, T.-H., ONOFRI, F., GREHAN, G.,
HAUGEN, P.: "Dual Mode Phase Doppler
Anemometry"
in: Proceedings 7th International Symposium on
Application of Laser Fluid Mechanics, Lisboa
(1975) 18.3.1-18.3.8;

54 Verfahren und Vorrichtung zum Messen des Durchmessers eines sich durch ein Meßvolumen bewegenden Teilchens

57 Verfahren zum Messen des Durchmessers eines sich durch ein Meßvolumen bewegenden Teilchens, das die folgenden Schritte umfaßt:

(a) Erzeugen eines Intensitätsmusters monochromatischen, polarisierten Lichts aus mindestens einem Winkelspektrum ebener Lichtwellen, wobei das Meßvolumen als zumindest ein Teil des Bereiches bestimmt ist, in dem sich die ebenen Lichtwellen schneiden und das Intensitätsmuster bilden;

(b) Erfassen des an dem sich durch das Meßvolumen bewegenden Teilchen gestreuten Lichts mit mindestens zwei auf das Meßvolumen ausgerichteten Detektor-Einrichtungen;

(c) Bestimmen der Frequenzamplitudenspektren beider Detektor-Signale;

(d) Bestimmen der Phasendifferenzen $\Delta\Phi$ zwischen beiden Detektor-Signalen für diejenigen Frequenzen f , die sich in einem vorgebbaren Frequenzbereich befinden und deren Amplituden einen vorgebbaren Amplitudenschwellenwert übersteigen;

(e) Bestimmen des Durchmessers d des Teilchens anhand des Verlaufs der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Frequenz f -Kurve, und Vorrichtung zur Durchführung desselben.

DE 197 49 233 C 1

DE 197 49 233 C 1

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Messen des Durchmessers eines sich durch ein Meßvolumen bewegendes Teilchens.

Die US-4,986,659 offenbart ein Laser-Doppler-Gerät zum Messen des Durchmessers eines sich in einer Strömung innerhalb eines Meßvolumens bewegendes Teilchens, wobei das Meßvolumen als der Bereich bestimmt ist, in dem sich mindestens zwei von einer Einrichtung erzeugte, zueinander in einer bestimmten Phasenbeziehung stehende Laserstrahlen kreuzen, mit mindestens zwei, auf das Meßvolumen ausgerichteten Detektor-Einheiten zur Erfassung und Detektierung der am zu vermessenden Teilchen gestreuten Laserstrahlen und zur Abgabe von Signalen und mit einer Signalverarbeitungseinrichtung zur Ermittlung des Durchmessers des Teilchens aus den Signalen der Detektor-Einheiten. Die Bestimmung des Teilchendurchmessers beruht auf der Annahme, daß das von dem sich durch das Meßvolumen bewegendes Teilchen gestreute Licht zu einem Detektor-Signal, Doppler-Burst genannt, führt, das nur eine einzige Frequenz, die sogenannte Doppler-Burst-Frequenz, enthält. Aus der Phasendifferenz zwischen den von beiden Detektor-Einheiten detektierten Doppler-Bursts wird dann auf den Teilchendurchmesser geschlossen. Die Geräte werden daher auch als Phasen-Doppler-Anemometer (PDA) bezeichnet. Neben dem Teilchendurchmesser läßt sich mit PDA-Geräten gleichzeitig auch die Teilchengeschwindigkeit bestimmen. Das vorangehend beschriebene Meßsystem stellt ein Standard-PDA-Meßsystem dar. Aus der US-5,684,587 ist ein Standard-PDA-Meßsystem bekannt, bei dem durch spezielle Formgebung der Detektoröffnungen Einfluß auf die teilchengrößenabhängige Streulichtintensität und auf den Verlauf der Phasendifferenz-Teilchendurchmesser-Beziehung genommen wird.

Ausgehend von den Standard-PDA-Meßsystemen wird in der DE 43 26 979 C1 ein sogenanntes planares PDA-System vorgeschlagen, bei dem die Laserstrahlen und die zwei Detektor-Einheiten mit einer Komponente des Strömungsvektors so angeordnet sind, daß die Strömungskomponente, die Ausbreitungsvektoren für die Laserstrahlen und die Detektorrichtungsvektoren für die Detektoreinheiten in einer gemeinsamen Ebene liegen und die Detektor-Einheiten mit ihren Detektorrichtungsvektoren so in der Ebene angeordnet sind, daß beide Streulicht von demselben Teilchen erfassen. Wenn keine idealen Meßbedingungen vorliegen, weisen die detektierten Signale jedoch nicht die Form eines idealen Doppler-Bursts auf, wodurch sich die dominante Frequenz verschieben kann, bei der die Phasendifferenz bestimmt wird. Die hieraus resultierenden Schwankungen der Phasendifferenz und damit des gemessenen Teilchendurchmessers finden sich nicht im wahren Durchmesser wieder. Eine Beurteilung hinsichtlich der Meßgenauigkeit und eine Auswahl von Validierungskriterien ist sehr schwierig. Ein Ausweg wurde über Mehrfachmessungen an demselben Teilchen gesucht.

So wird beispielsweise von C. Tropea, T.-H. Xu, F. Onofri, G. Gréhan und P. Haugen in "Dual Mode Phase Doppler Anemometry", Proceedings 7th International Symposium on Application of Laser Fluid Mechanics, Lisbon, 1995, 18.3.1 bis 18.3.7, ein PDA-Meßsystem vorgestellt, das eine Kombination aus einem Standard-PDA-System und einem planaren PDA-System ist. Das System verwendet vier Detektoren, um die Genauigkeit einer Teilchendurchmessermessung zu erhöhen. In einer weiteren Veröffentlichung von C. Tropea, T.-H. Xu, F. Onofri, G. Gréhan, P. Haugen und M. Stieglmeier ("Dual-Mode Phase-Doppler Anemometer", Part. Part. Syst. Charact. 13 (1996) 165 bis 170) wird noch genauer auf die Anwendung und das Verfahren zur Auswertung des Teilchendurchmessers bei Verwendung zweier Detektorpaare eingegangen. Mit einem derartigen PDA-Meßsystem werden diverse Störeffekte wie auch scheinbar willkürliche Streuungen des Teilchenmesser-Einzelmeßwertes durch den Einsatz mehrerer Detektoreinheiten umgangen.

Aus der US-4,701,051 ist ein Laser-Doppler-Gerät bekannt, das drei Detektor-Einrichtungen aufweist, um auch über einen Phasendifferenzbereich von 2π hinaus messen zu können. Drei Detektor-Einrichtungen werden auch dazu benutzt, um zwei Durchmessermessungen, und zwar mit einem kleinen und einem großen Durchmessermeßbereich, durchzuführen und die Meßergebnisse zu vergleichen.

Die oben beschriebenen Meßsysteme weisen den Nachteil auf, daß sie im Verhältnis zum einen Standard-PDA-Meßsystem deutlich mehr Geräte, insbesondere auf der Empfangsseite, d. h. mehr Detektor-Einrichtungen nebst Komponenten zur Spannungsversorgung und Signalverarbeitungseinrichtungen, wie z. B. Filtereinrichtungen, Signalverstärker- und -auswertungseinrichtungen umfassen und somit sehr teuer sind, zumal sie auch die für die Anwendungen typischerweise sehr hohen Datenraten bewältigen können müssen.

Der vorliegenden Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren und eine Vorrichtung bereitzustellen, mit denen eine genauere Messung des Teilchendurchmessers und mit einem geringeren Geräteaufwand ermöglicht wird.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe dadurch gelöst, daß das Verfahren die folgenden Schritte umfaßt

- (a) Erzeugen eines Intensitätsmusters monochromatischen, polarisierten Lichts aus mindestens einem Winkelspektrum ebener Lichtwellen, wobei das Meßvolumen als zumindest ein Teil des Bereiches bestimmt ist, in dem sich die ebenen Lichtwellen schneiden und das Intensitätsmuster bilden;
- (b) Erfassen des an dem sich durch das Meßvolumen bewegendes Teilchen gestreuten Lichts mit mindestens zwei auf das Meßvolumen ausgerichteten Detektor-Einrichtungen;
- (c) Bestimmen der Frequenzamplitudenspektren beider Detektor-Signale;
- (d) Bestimmen der Phasendifferenzen $\Delta\Phi$ zwischen beiden Detektor-Signalen für diejenigen Frequenzen f , die sich in einem vorgebbaren Frequenzbereich befinden und deren Amplituden einen vorgebbaren Amplitudenschwellenwert übersteigen;
- (e) Bestimmen des Durchmessers d des Teilchens anhand des Verlaufes der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Frequenz f -Kurve.

Unter einem Winkelspektrum ebener Lichtwellen sind mehrere ebene Lichtwellen zu verstehen, die nicht zueinander parallel sind, sondern sich über einen bestimmten Winkelbereich ausbreiten.

Diese Aufgabe wird zudem bei einer Vorrichtung der eingangs genannten Art dadurch gelöst, daß sie umfaßt

- eine Einrichtung zur Erzeugung eines Winkelspektrums ebener Lichtwellen, die sich im Meßvolumen schneiden und ein Intensitätsmuster monochromatischen polarisierten Lichts bilden,

- mindestens zwei auf das Meßvolumen ausgerichtete Detektor-Einrichtungen zur Erfassung und Detektierung des an dem sich durch das Meßvolumen bewegendes Teilchen gestreuten Lichts und zur Abgabe von Signalen und
- eine Signalverarbeitungseinrichtung zur Ermittlung des Durchmessers des Teilchens, wobei die Signalverarbeitungseinrichtung eine Einrichtung zur Ermittlung der Frequenzamplitudenspektren der Detektor-Signale umfaßt und die Signalverarbeitungseinrichtung so ausgebildet ist, daß sie die Phasendifferenzen zwischen den Detektorsignalen in einem vorgebbaren Frequenzbereich zu bestimmen und aus dem Verlauf der Phasendifferenz-Frequenz-Kurve den Durchmesser des Teilchens zu bestimmen vermag.

Bei dem Verfahren kann gemäß einer ersten besonderen Ausführungsform vorgesehen sein, daß das Winkelspektrum mittels eines im Meßvolumen fokussierten Laserstrahls erzeugt wird. Ein fokussierter Laserstrahl besteht nämlich aus einem Winkelspektrum ebener Lichtwellen.

Andererseits kann auch vorgesehen sein, daß zwei Winkelspektren gleicher Lichtwellenlänge λ unter einem Schnittwinkel θ im Meßvolumen zum Schnitt gebracht werden. Das von den beiden Winkelspektren erzeugte Meßvolumen besteht dann aus Interferenzvolumina von Paaren ebener Lichtwellen.

Wiederum kann auch vorgesehen sein, daß drei Winkelspektren gleicher Lichtwellenlänge λ im Meßvolumen zum Schnitt gebracht werden.

Ferner kann vorgesehen sein, daß als auszuwertender Frequenzbereich der gesamte Frequenzbereich vorgegeben wird.

Alternativ kann auch vorgesehen sein, daß als auszuwertender Frequenzbereich der gesamte Frequenzbereich mit Ausnahme des Pedestal-Bereiches vorgegeben wird. Mit Pedestal-Bereich sind die Frequenzen im Bereich der Frequenz Null (Grundwellenanteil) gemeint.

Wiederum alternativ kann vorgesehen sein, daß als auszuwertender Frequenzbereich der Pedestal-Bereich vorgegeben wird.

Günstigerweise werden die Frequenzamplitudenspektren mittels Fourier-Transformation bestimmt.

Weiterhin kann gemäß einer besonderen Ausführungsform vorgesehen sein, daß die Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Frequenz f-Kurve in eine Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Strahlschnittwinkel θ -Kurve umgewandelt und durch ein Polynom n-ten Grades angenähert, das ermittelte Polynom mit vorab bestimmten Polynomen zur Beschreibung von theoretisch berechneten $\Delta\Phi$ - θ -Kurven für verschiedene Teilchendurchmesser verglichen und der Durchmesser d des zu vermessenden Teilchens als derjenige Durchmesser bestimmt wird, bei dem die geringste Abweichung zwischen dem Polynom der ermittelten $\Delta\Phi$ - θ -Kurve und einem Polynom der theoretischen $\Delta\Phi$ - θ -Kurven auftritt. Die Umwandlung der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Frequenz f-Kurve in eine Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Strahlschnittwinkel θ -Kurve ist dabei vorteilhaft, da die Frequenz f von der jeweiligen Geschwindigkeit des Teilchens abhängt. Je höher der Grad des Polynoms ist, desto genauer wird die Bestimmung des Teilchendurchmessers.

Dabei kann vorgesehen sein, daß die theoretischen $\Delta\Phi$ - θ -Kurven unter Verwendung der Mie-Theorie berechnet werden.

Günstigerweise werden die Polynome mittels einer Regression berechnet.

Dabei kann vorgesehen sein, daß Polynome zweiten Grades berechnet werden.

Günstigerweise wird die geringste Abweichung mittels Fehlerquadratminimierung der Polynomkoeffizienten bestimmt.

Vorzugsweise wird die Messung verworfen, wenn weniger als m Frequenzen eine Amplitude aufweisen, die den Amplitudenschwellenwert übersteigt. Damit wird eine Auswertung von z. B. verrauschten und damit erheblich fehlerbelasteten Signalen verhindert.

Außerdem kann vorgesehen sein, daß die Messung verworfen wird, wenn die Abweichung zwischen dem Polynom einer gemessenen $\Delta\Phi$ - θ -Kurve und dem Polynom mit einer theoretischen $\Delta\Phi$ - θ -Kurve einen vorgebbaren Wert überschreitet.

Vorzugsweise entspricht der vorgebbare Wert der Breite einer Teilchendurchmesserklasse. Hierbei wird vorausgesetzt, daß - wie üblich - die Auswertung anhand von Teilchendurchmesserklassen, d. h. diskreten Teilchendurchmesserwerten, vorgenommen wird.

Weiterhin kann vorgesehen sein, daß die zur Bestimmung des Durchmessers d verwendeten Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Werte in Durchmesser-Werte umgewandelt werden. Damit erhält man neben einem aus Mehrfachmessungen an demselben Teilchen bestimmten Teilchendurchmesser auch die einzelnen Ergebnisse der Mehrfachmessung.

Dabei kann vorgesehen sein, daß die Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Werte mittels Mie-Theorie in Durchmesser-Werte umgewandelt werden. Dies ist die derzeit genaueste Auswertung.

Alternativ kann auch vorgesehen sein, daß die Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Werte mittels geometrischer Optik in Durchmesser-Werte umgewandelt werden. Die geometrische Optik stellt nur eine Näherung für Teilchen mit einem Durchmesser von mehr als ungefähr 5 μm dar.

Außerdem kann vorgesehen sein, daß die Abweichungen der Durchmesser-Werte von dem Durchmesser d berechnet werden. Die berechneten Abweichungen können zur Beurteilung der Güte der Messung herangezogen werden.

Insbesondere kann dabei vorgesehen sein, daß aus den Abweichungen eine Größe berechnet wird, die ein Maß für die Sphärizität des Teilchens liefert. Wenn die Abweichungen sehr gering sind, so bedeutet dies normalerweise, daß das Teilchen zumindest nahezu kugelförmig ist, da das Teilchen an mehreren Oberflächenbereichen vermessen worden ist.

Weiterhin kann dabei vorgesehen sein, daß die Messung verworfen wird, wenn die Größe einen vorgebbaren Wert über- oder unterschreitet. Letzteres hängt davon ab, wie die Sphärizität-Größe definiert ist. Auf diese Weise werden z. B. Messungen verworfen, die stark von der der Mie-Theorie zugrundeliegenden Annahme einer kugelförmigen Partikel abweichen.

Andererseits kann auch vorgesehen sein, daß aus den Abweichungen eine Größe berechnet wird, die ein Maß für die Oberflächenstruktur des Teilchens liefert. Dies kann Vorteile haben, wenn das Teilchen im wesentlichen kugelförmig ist, jedoch eine gewisse Oberflächenfeinstruktur aufweist, die auf diese Weise genauer bestimmt wird.

Es kann auch vorgesehen sein, daß aus den Abweichungen eine Größe berechnet wird, die ein Maß für den Brechungs-

index des Teilchens liefert.

Außerdem kann auch vorgesehen sein, daß aus den Abweichungen eine Größe berechnet wird, die ein Maß für die Zusammensetzung des Teilchens liefert. Mit Zusammensetzung ist z. B. eine Suspension oder Emulsion gemeint.

Gemäß einer weiteren besonderen Ausführungsform der Erfindung kann vorgesehen sein, daß die Geschwindigkeit des Teilchens anhand des Frequenzamplitudenspektrums zumindestens eines der Detektor-Signale bestimmt wird.

Andererseits kann auch vorgesehen sein, daß die Geschwindigkeit des Teilchens anhand der Breite der Frequenzamplitudenverteilung im Pedestal-Bereich bestimmt wird. Dies ist zumindest dann erforderlich, wenn nur der Pedestal zur Auswertung verwendet wird.

Andererseits kann vorgesehen sein, daß die Frequenz, bei der das Frequenzamplitudenspektrum ein lokales Maximum aufweist, in einen die Geschwindigkeit des Teilchens bestimmenden Meßwert umgewandelt wird.

Insbesondere ist es dabei vorteilhaft, wenn das Frequenzamplitudenspektrum vorab im Bereich des/der Maximums-Maxima interpoliert wird.

Vorteilhafterweise wird die Messung verworfen, wenn die aus beiden Detektor-Signalen ermittelten Geschwindigkeiten sich um einen vorgebbaren Betrag oder mehr unterscheiden.

Die Vorrichtungsunteransprüche betreffen vorteilhafte Weiterbildungen der Vorrichtung.

Der Erfindung liegt die überraschende Erkenntnis zugrunde, daß ein Winkelspektrum ebener Lichtwellen, die im Meßvolumen zum Schnitt gebracht werden, nicht zu einem einzigen, sondern zu mehreren Interferenzvolumina von Paaren ebener Lichtwellen und dies wiederum zu einem Detektor-Signal führt, das nicht eine einzige Frequenz, sondern eine Frequenzverteilung enthält. Mit dem vorliegenden Verfahren wird die in der Frequenzverteilung zusätzlich enthaltene Information ausgenutzt, um genauere Messungen des Teilchendurchmessers durchzuführen und weitere Informationen über die Meßgenauigkeit und die Gestalt und/oder Zusammensetzung des Teilchens zu erhalten. Die Ermittlung einer Phasendifferenz-Frequenz-Verteilung aus einem jeweiligen Signalaar entspricht nämlich einer Anzahl von parallel durchgeführten Durchmesser-messungen an demselben Teilchen, wobei jeweils andere Oberflächenbereiche für die Messung genutzt werden. Der Einsatz von komplexeren Intensitätsmustern führt zu variablen Stützstellenverteilungen der Phasendifferenz-Frequenz-Kurve. Die Informationsmenge läßt sich durch Erhöhung der Anzahl der auswertbaren Spektrallinien weiter steigern. Es treten dann nämlich weitere auswertbare Phasendifferenz-Frequenz-Wertepaare auf, die einer größeren Anzahl von parallel durchgeführten Messungen entsprechen. Die Erfindung weist im einzelnen die folgenden Vorteile auf:

- Es ist eine Verifikation der Einzeldurchmesser-messung durch parallele Durchmesser-messungen möglich.
- Im Vergleich zur Phasen-Doppler-Anemometrie ergibt sich durch die Mehrfachmessung eine deutliche Steigerung der Genauigkeit des Einzelmeßergebnisses bei einem vergleichbaren apparativen und finanziellen Aufwand. Gegenüber den eingangs beschriebenen erweiterten PDA-Meßsystemen ist für die Durchführung des Verfahrens ein deutlich geringerer Geräteaufwand und damit geringerer Kostenaufwand erforderlich. Auf diesem Wege kann die Genauigkeit der Teilchendurchmesser-messungen wie auch die Unempfindlichkeit gegenüber Fehlerquellen so gesteigert werden, daß eine derartige Meßtechnik auch in Anwendungsbereichen mit höheren Anforderungen an die Teilchengrößenbestimmung einsetzbar ist. Hier sind als Beispiele Massenbilanzierungen oder die Bestimmungen von Volumen- und Massenteilungen, in die die dritte Potenz des Teilchendurchmessers eingeht, zu nennen. Eine Vervielfachung der auswertbaren Teilchendurchmesser-datenmenge unter Verwendung eines Minimums an Geräten auf der Sende- und/oder Empfangsseite stellen die Basis für ein optisches Partikelmeßsystem dar, mit dem sich selbst Volumenverteilungen zuverlässig messen lassen.
- Jede einzelne Phasendifferenz bezieht sich auf einen anderen Oberflächenbereich des Teilchens. Hierdurch werden Aussagen über die Oberfläche des Teilchens möglich.
- Der Durchmessermeßbereich wird nicht durch den Phasendifferenzmeßbereich von 2π begrenzt. Während bei einer Standard-PDA-Meßanordnung eine einzige Phasendifferenz als Meßwert nicht ausreicht, um zu entscheiden, ob eine Phasendifferenz beispielsweise 27 Grad oder 360 Grad plus 27 Grad beträgt, ist dies gemäß dem vorliegenden Verfahren sofort möglich, sobald mehr als eine Phasendifferenz bei unterschiedlichen Frequenzen (Spektrallinien) zur Verfügung stehen. Schon die lokale Steigung der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Frequenz f -Kurve am Ort nur eines Frequenzamplituden-Peaks, wie er bei einer Standard-PDA-Meßanordnung zu finden ist, reicht für das vorliegende Verfahren aus, um zu entscheiden, wievielfach der Meßbereich (2π) überschritten wurde. Bei Verwendung von zwei Laserstrahlen wie bei einer Standard-PDA-Meßanordnung erlaubt im Normalfall die Annahme einer linearen Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Frequenz f -Beziehung die Grobeinordnung der Phasendifferenz anhand der lokalen Steigung. Im allgemeinen Fall kann die Grobeinordnung folgendermaßen erfolgen: Soll im Zuge einer schnellen Auswertung die gemessene Phasendifferenz $\Delta\Phi$ Frequenz f -Kurve mittels eines Polynoms mit einem Argumentbereich größer als 2π genähert werden, so muß die Grobeinordnung bereits vor der Näherung vorgenommen werden. Hier wird anhand der lokalen Steigung entschieden, ob die Phasendifferenzen $\Delta\Phi$ einzelner Frequenzamplitudenverteilungen um ein Vielfaches von 2π verschoben werden sollen.
- Es steht eine parallel durch dasselbe Gerät gemessene Anzahl von Phasendifferenzen zur Verfügung, um eine Beurteilung der Meßwertgüte zu erlauben.
- Das Meßverfahren ist gegenüber Schwankungen in der Signalform, d. h. Verschiebungen im Frequenzspektrum, unempfindlich.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen und aus der nachstehenden Beschreibung, in der Ausführungsbeispiele anhand der schematischen Zeichnungen im einzelnen erläutert sind.

Dabei zeigt:

Fig. 1a schematisch eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung,

Fig. 1b Details einer Einrichtung zur Erzeugung dreier Winkelspektren in Form von drei fokussierten Laserstrahlen mit derselben Lichtwellenlänge λ der Vorrichtung von Fig. 1a;

Fig. 2 eine kombinierte Darstellung eines Frequenzamplitudenspektrums und der zugehörigen gemessenen und theoretisch ermittelten spektralen Phasendifferenz; und

Fig. 3 eine kombinierte Darstellung eines Frequenzamplitudenspektrums und der zugehörigen theoretisch ermittelten spektralen Phasendifferenz für einen simulierten Durchgang eines 2 µm-Teilchens durch nur einen einzigen fokussierten Laserstrahl.

Fig. 1a zeigt schematisch eine Ausführungsform der erfindungsgemäßen Vorrichtung. Auf der Sendeseite (links in Fig. 1a) schneiden sich drei Laserstrahlen 20, 22, 24 mit derselben Lichtwellenlänge λ unter einem Strahlschnittwinkel θ_1 bzw. θ_2 . Auf der Empfangsseite (rechts in Fig. 1a) sind zwei Detektoreinrichtungen 30, 32 zur Erfassung und Detektierung des an dem sich durch das Meßvolumen bewegenden Teilchen gestreuten Lichts und zur Abgabe von Signalen unter demselben off-axis-Winkel ϕ symmetrisch zur x-y-Ebene, d. h. unter einem jeweiligen Elevation-Winkel $+\Psi$ bzw. $-\Psi$ angeordnet, so daß sie auf einer Gradon parallel zur Bewegungsrichtung der Teilchen liegen. Die Winkel sind wie folgt gewählt: $\theta_1 = 2,40$ Grad, $\theta_2 = 2,86$ Grad, $\phi = 35$ Grad und $\Psi = 1,85$ Grad.

Fig. 1b zeigt Details einer Einrichtung zur Erzeugung eines Winkelspektrums in Form von drei mittels einer Linse 26 fokussierten Laserstrahlen 20, 22, 24 mit derselben Lichtwellenlänge λ der Vorrichtung von Fig. 1b. Die Laserwellenlänge λ beträgt 632,8 nm. Der Laserstrahl hat am Laserkopf (nicht gezeigt) direkt vor der ersten Linse 34 einen Durchmesser von 1,2 mm. Als Strahlteiler dient ein Beugungsgitter 28 mit einer Gitterkonstanten g von 8 µm. Um die drei fokussierten Laserstrahlen 20, 22, 24 zu erzeugen, werden die beiden ersten und die nullte Beugungsordnung benutzt. Um drei unterschiedliche dominante Frequenzen (Frequenz-Peak) zu erzeugen, ist das Gitter geneigt. Dies hat zur Folge, daß die Beugungsordnungen mit gleichem Betrag im Gegensatz zu einem senkrecht angeordneten Gitter nicht mehr gleiche Beugungswinkel aufweisen. Hierdurch läßt sich erreichen, daß bei Verwendung der Beugungen -1-, 0- und +1-ter Ordnungen, die aufgrund ihrer hohen und - dies ist für ein ausgeprägtes Intensitätsmuster besonders wichtig - vergleichbaren Strahlintensitäten verwendet werden sollten, neben dem Pedestal drei unterschiedlich dominante Frequenzen im Detektor-Signal zu finden sind. Diese ergeben sich durch paarweise Interferenz der drei Laserstrahlen und liefern somit mindestens drei Stützstellen des Verlaufes der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Frequenz f -Kurve, die nachfolgend als spektrale Phasendifferenz bezeichnet wird, da für den Begriff "Frequenz" im Bereich der Signalverarbeitung auch der Begriff "Spektrallinie" verwendet wird.

Fig. 2 zeigt eine kombinierte Darstellung eines Frequenzamplitudenspektrums (Balkendiagramm) eines Detektor-Signals beim Durchgang eines Teilchens durch das Meßvolumen und der zugehörigen gemessenen (Kreis-, Dreieck- und Quadrat-Symbole) und theoretisch ermittelten (durchgezogene Linie) spektralen Phasendifferenzen. Da im vorliegenden Fall der Pedestaltbereich nicht mit ausgewertet wird, fehlt dieser auch in der Darstellung des Frequenzamplitudenspektrums. Die Punkt-, Quadrat- und Dreieck-Symbole stellen gemessene Phasendifferenzen dar. Die durchgezogene Linie ergibt sich mittels der Mie-Theorie für ein Teilchen mit einem Durchmesser von 85 µm. Wie der Darstellung der spektralen Phasendifferenz entnehmbar ist, liegen die gemessenen Phasendifferenzwerte im Bereich der dominanten Frequenzen sehr gut auf der berechneten Kurve, während außerhalb dieser Bereiche große Streuungen auftreten. Dies rührt daher, daß die kleinen Frequenzamplituden sich aufgrund von Rauschen ergeben. Es muß daher durch Festlegung eines geeigneten Amplitudenschwellenwerts sichergestellt werden, daß durch Rauschen bedingte Frequenzanteile nicht ausgewertet werden.

Fig. 3 zeigt eine kombinierte Darstellung eines Frequenzamplitudenspektrums eines Detektor-Signals und der zugehörigen theoretisch ermittelten spektralen Phasendifferenz für einen simulierten Durchgang eines 2 µm-Teilchens durch nur einen einzigen fokussierten Laserstrahl. Das Frequenzamplitudenspektrum weist nur im Pedestal-Bereich Frequenzanteile auf. Sofern die Frequenzverteilung ausreichend breit ist, d. h. eine für die weitere Auswertung ausreichende Anzahl von Stützstellen liefert, reicht somit auch ein einziger Laserstrahl aus, um den Teilchendurchmesser mit einer hohen Genauigkeit zu bestimmen.

Im folgenden soll die Auswertung der gemessenen spektralen Phasendifferenzen, d. h. der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Frequenz f -Kurven beschrieben werden:

Vorab sind theoretische Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Strahlschnittwinkel θ -Kurven für jede gewünschte Teilchendurchmesserklasse zu berechnen. Diese theoretischen $\Delta\Phi$ - θ -Kurven werden durch ein Polynom eines vorgegebenen, die Genauigkeit der späteren Auswertung bestimmenden Grades angenähert. Bei kugelförmigen Partikeln kann für die Berechnung der theoretischen $\Delta\pi$ - θ -Kurven ein Mie-Programm eingesetzt werden. Über die Relation zwischen Interferenzstreifenabstand Δ , Strahlschnittwinkel θ und Laserwellenlänge λ , wird die Abszisse vom Strahlschnittwinkel θ auf den Kehrwert des Interferenzstreifenabstandes Δ umgerechnet:

$$\Delta = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)}$$

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{2 \sin(\theta/2)}{\lambda}$$

Dieser Kehrwert ist nun über die Geschwindigkeitskomponente $|v_z|$ des Teilchens senkrecht zu den Interferenzstreifen mit der jeweiligen Frequenz wie folgt verknüpft:

$$f = \frac{1}{\Delta} \cdot |v_z|$$

5 Der Proportionalitätsfaktor $|v_z|$ wird über den Vergleich einer ausgezeichneten Frequenz mit dem zugehörigen Strahlschnittwinkel θ bestimmt. Als eine solche ausgezeichnete Frequenz eignet sich beispielsweise der Peak eines Frequenzamplitudenspektrums. Diesem Peak, der sich durch Gaußinterpolation auch genauer als auf eine Spektrallinie bestimmen läßt, ist der Strahlschnittwinkel des zugehörigen Laserstrahlpaares zuzuordnen. Da sich die Geschwindigkeitskomponente $|v_z|$ bei jeder Messung an einem Teilchen ändert, bietet es sich an, die gemessene spektrale Phasendifferenz, also
 10 die $\Delta\Phi$ -f-Kurve in eine $\Delta\Phi$ - θ -Kurve umzurechnen. Für die weitere Auswertung werden nur die Strahlschnittwinkel berücksichtigt, bei denen sich die Frequenzamplituden in ausreichender Höhe aus dem Rauschen abheben. Über eine Regression wird schließlich durch die verbleibenden Punkte ($\Delta\Phi$ - θ -Paare) ein Polynom des zuvor bereits bei den theoretisch berechneten $\Delta\Phi$ - θ -Kurven gewählten Grades gelegt. Mittels beispielsweise Fehlerquadratminimierung der Polynomkoeffizienten wird das ähnlichste der berechneten Polynome der theoretischen $\Delta\Phi$ - θ -Kurven gefunden. Da jedes be-
 15 rechnete Polynom für eine Teilchendurchmesserklasse steht, ist damit der Teilchendurchmesser bekannt. Der Gesamtfehler der Durchmesserbestimmung setzt sich aus dem der Regression und dem Fehlerquadrat der Durchmesserklassenzuordnung zusammen. Er liefert die Genauigkeit und auch die Güte der Vermessung des Teilchens. Liegt der Fehler deutlich höher als durch den Abstand zwischen zwei benachbarten Kurven, was also durch die Durchmesserklassenbreite zu erklären wäre, muß die Messung als fehlerhaft bezeichnet werden.

20 Im Falle einer durch nur einen Laserstrahl hervorgerufenen Frequenzamplitudenverteilung, wenn also nur der Pedestal zur Messung herangezogen werden soll, ist der Peak nicht als ausgezeichnete Frequenz im obigen Sinne verwendbar, weil er hier bei der Frequenz Null zu finden ist. Die einfachste Möglichkeit, den Faktor $|v_z|$ zu bestimmen, ist bei der gemessenen Gaußverteilung, nicht bei der transformierten, durch Gaußinterpolation die Verteilungsbreite zu bestimmen, mit der Signalabtastrfrequenz in Beziehung zu setzen und so die Zeit für das Durchqueren des Laserstrahls zu berechnen.
 25 Zusammen mit dem bekannten Durchmesser des eingesetzten Laserstrahls folgt die Geschwindigkeitskomponente $|v_z|$.

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, die transformierte Verteilung zu nehmen, d. h. anstelle des gaußförmigen Signals die - fast - gaußförmige Intensitätsverteilung nach der Fouriertransformation zu verwenden. Die Verteilungsbreiten sind umgekehrt proportional zueinander und können direkt ineinander umgerechnet werden. Mit der zurückgerechneten Verteilungsbreite der Verteilung im Meßsignal wird weiter so verfahren, wie bei der einfachsten vorgestellten
 30 Möglichkeit. Auch im Frequenzraum ist die Verteilungsbreite zunächst über eine Gaußinterpolation zu bestimmen.

Bei der Auswertung ist es als wesentlich hervorzuheben, daß jede der im Frequenzamplitudenspektrum des Detektor-Signals verwertbare, d. h. über das Rauschen hervorgehobene Spektrallinie (Frequenz) als Ergebnis einer unabhängigen virtuellen (PDA)-Messung angesehen wird und dementsprechend ausgewertet wird.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können Widersprüche zwischen den einzelnen Phasendifferenzen entweder
 35 auf Unterschiede in den Übertragungsfunktionen beider Detektor-Einrichtungen zurückgeführt werden oder darauf, daß es sich nicht um ein einzelnes, sphärisches Streuobjekt handelt. Es können Verfälschungen der Durchmesserbestimmung durch Nichtsphärizität oder Mehrfachstreuung erkannt werden, wodurch zusätzliche Validierungskriterien zur Verfügung stehen. Darüber hinaus kann der Meßbereich für die Phasendifferenz über den 2π -Bereich ausgedehnt werden.

40 Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen des Durchmessers eines sich durch ein Meßvolumen bewegenden Teilchens, das die folgenden Schritte umfaßt:
 45 (a) Erzeugen eines Intensitätsmusters monochromatischen, polarisierten Lichts aus mindestens einem Winkelspektrum ebener Lichtwellen, wobei das Meßvolumen als zumindest ein Teil des Bereiches bestimmt ist, in dem sich die ebenen Lichtwellen schneiden und das Intensitätsmuster bilden;
 (b) Erfassen des an dem sich durch das Meßvolumen bewegenden Teilchen gestreuten Lichts mit mindestens zwei auf das Meßvolumen ausgerichteten Detektor-Einrichtungen;
 (c) Bestimmen der Frequenzamplitudenspektren beider Detektor-Signale;
 50 (d) Bestimmen der Phasendifferenzen $\Delta\Phi$ zwischen beiden Detektor-Signalen für diejenigen Frequenzen f, die sich in einem vorgebbaren Frequenzbereich befinden und deren Amplituden einen vorgebbaren Amplitudenschwellenwert übersteigen;
 (e) Bestimmen des Durchmessers d des Teilchens anhand des Verlaufes der Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Frequenz f-Kurve.
 55 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Winkelspektrum mittels eines im Meßvolumen fokussierten Laserstrahls erzeugt wird.
 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Winkelspektren gleicher Lichtwellenlänge λ unter einem Schnittwinkel θ im Meßvolumen zum Schnitt gebracht werden.
 4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß drei Winkelspektren gleicher Lichtwellenlänge λ im Meßvolumen zum Schnitt gebracht werden.
 60 5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß als auszuwertender Frequenzbereich der gesamte Frequenzbereich vorgegeben wird.
 6. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß als auszuwertender Frequenzbereich der gesamte Frequenzbereich mit Ausnahme des Pedestal-Bereiches vorgegeben wird.
 65 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß als auszuwertender Frequenzbereich der Pedestal-Bereich vorgegeben wird.
 8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenzamplitudenspektren mittels Fourier-Transformation bestimmt werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Frequenz f -Kurve in eine Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Strahlschnittwinkel θ -Kurve umgewandelt und durch ein Polynom n -ten Grades angenähert, das ermittelte Polynom mit vorab bestimmten Polynomen zur Beschreibung von theoretisch berechneten $\Delta\Phi$ - θ -Kurven für verschiedene Teilchendurchmesser verglichen und der Durchmesser d des zu vermessenden Teilchens als derjenige Durchmesser bestimmt wird, bei dem die geringste Abweichung zwischen dem Polynom der ermittelten $\Delta\Phi$ - θ -Kurve und einem Polynom der theoretischen $\Delta\Phi$ - θ -Kurven auftritt. 5
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die theoretischen $\Delta\Phi$ - θ -Kurven unter Verwendung der Mie-Theorie berechnet werden.
11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Polynome mittels einer Regression berechnet werden. 10
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß Polynome zweiten Grades berechnet werden.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die geringste Abweichung mittels Fehlerquadratminimierung der Polynomkoeffizienten bestimmt wird.
14. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Messung verworfen wird, wenn weniger als m Frequenzen eine Amplitude aufweisen, die den Amplitudenschwellenwert übersteigt. 15
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Messung verworfen wird, wenn die Abweichung zwischen dem Polynom einer gemessenen $\Delta\Phi$ - θ -Kurve und dem Polynom einer theoretischen $\Delta\Phi$ - θ -Kurve einen vorgebbaren Wert überschreitet.
16. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß der vorgebbare Wert der Breite einer Teilchendurchmesserklasse entspricht. 20
17. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die zur Bestimmung des Durchmessers d verwendeten Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Werte in Durchmesser-Werte umgewandelt werden.
18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Werte mittels Mie-Theorie in Durchmesser-Werte umgewandelt werden. 25
19. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Phasendifferenz $\Delta\Phi$ -Werte mittels geometrischer Optik in Durchmesser-Werte umgewandelt werden.
20. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Abweichungen der Durchmesser-Werte von dem Durchmesser d berechnet werden.
21. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Abweichungen eine Größe berechnet wird, die ein Maß für die Sphärizität des Teilchens liefert. 30
22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß die Messung verworfen wird, wenn die Größe einen vorgebbaren Wert über- oder unterschreitet.
23. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Abweichungen eine Größe berechnet wird, die ein Maß für die Oberflächenstruktur des Teilchens liefert.
24. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Abweichungen eine Größe berechnet wird, die ein Maß für den Brechungsindex des Teilchens liefert. 35
25. Verfahren nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß aus den Abweichungen eine Größe berechnet wird, die ein Maß für die Zusammensetzung des Teilchens liefert.
26. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Geschwindigkeit des Teilchens anhand des Frequenzamplitudenspektrums zumindest eines der Detektor-Signale bestimmt wird. 40
27. Verfahren nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, daß die Geschwindigkeit des Teilchens anhand der Breite der Frequenzamplitudenverteilung im Pedestal-Bereich bestimmt wird.
28. Verfahren nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz, bei der das Frequenzamplitudenspektrum ein lokales Maximum aufweist, in einen die Geschwindigkeit des Teilchens bestimmenden Meßwert umgewandelt wird. 45
29. Verfahren nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, daß das Frequenzamplitudenspektrum vorab im Bereich des/der Maximums/Maxima interpoliert wird.
30. Verfahren nach einem der Ansprüche 26 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß die Messung verworfen wird, wenn die aus beiden Detektor-Signalen ermittelten Geschwindigkeiten sich um einen vorgebbaren Betrag oder mehr unterscheiden. 50
31. Vorrichtung zum Messen des Durchmessers eines sich durch ein Meßvolumen bewegenden Teilchens, mit
 - einer Einrichtung zur Erzeugung mindestens eines Winkelspektrums ebener Lichtwellen, die sich im Meßvolumen schneiden und ein Intensitätsmuster monochromatischen polarisierten Lichts bilden,
 - mindestens zwei auf das Meßvolumen ausgerichteten Detektor-Einrichtungen (30, 32) zur Erfassung und Detektierung des an dem sich durch das Meßvolumen bewegenden Teilchen gestreuten Lichts und zur Abgabe von Signalen, und 55
 - einer Signalverarbeitungseinrichtung zur Ermittlung des Durchmessers des Teilchens, wobei die Signalverarbeitungseinrichtung eine Einrichtung zur Ermittlung der Frequenzamplitudenspektren der Detektor-Signale umfaßt und die Signalverarbeitungseinrichtung so ausgebildet ist, daß sie die Phasendifferenzen zwischen den Detektorsignalen in einem vorgebbaren Frequenzbereich zu bestimmen und aus dem Verlauf der Phasendifferenz-Frequenz-Kurve den Durchmesser des Teilchens zu bestimmen vermag. 60
32. Vorrichtung nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Erzeugung mindestens eines Winkelspektrums ebener Wellen eine Einrichtung zur Erzeugung eines Laserstrahls und Fokussierung desselben im Meßvolumen umfaßt. 65
33. Vorrichtung nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Erzeugung mindestens eines Winkelspektrums ebener Lichtwellen eine Einrichtung zur Erzeugung zweier Laserstrahlen und Fokussierung derselben im Meßvolumen, wobei die fokussierten Laserstrahlen sich im Meßvolumen unter einem Schnittwinkel θ

schneiden, umfaßt.

34. Vorrichtung nach Anspruch 31, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Erzeugung mindestens eines Winkelspektrums ebener Lichtwellen eine Einrichtung zur Erzeugung dreier Laserstrahlen (20, 22, 24) und Fokussierung derselben im Meßvolumen, wobei die fokussierten Laserstrahlen (20, 22, 24) in einer Ebene liegen und sich im Meßvolumen schneiden, umfaßt.

35. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 32 bis 34, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Erzeugung des/der Laserstrahlen einen Laser mit Gaußschem Strahlprofil umfaßt.

36. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 32 bis 35, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Erzeugung des/der Laserstrahlen einen Laser umfaßt, der im sichtbaren Spektrum emittiert.

37. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 32 bis 35, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Erzeugung des/der Laserstrahlen einen Laser umfaßt, der im nicht sichtbaren Spektrum emittiert.

38. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 32 bis 34, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Erzeugung des/der Laserstrahlen eine Laserdiode umfaßt.

39. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 33 bis 38, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtung zur Erzeugung mindestens eines Winkelspektrums eine Strahlteilereinrichtung umfaßt.

40. Vorrichtung nach Anspruch 39, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlteilereinrichtung ein Beugungsgitter (28) umfaßt.

41. Vorrichtung nach Anspruch 40, dadurch gekennzeichnet, daß das Beugungsgitter (28) drehbar ist.

42. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 31 bis 41 dadurch gekennzeichnet, daß die Signalverarbeitungseinrichtung eine Einrichtung zur Ermittlung der Geschwindigkeit des Teilchens umfaßt.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

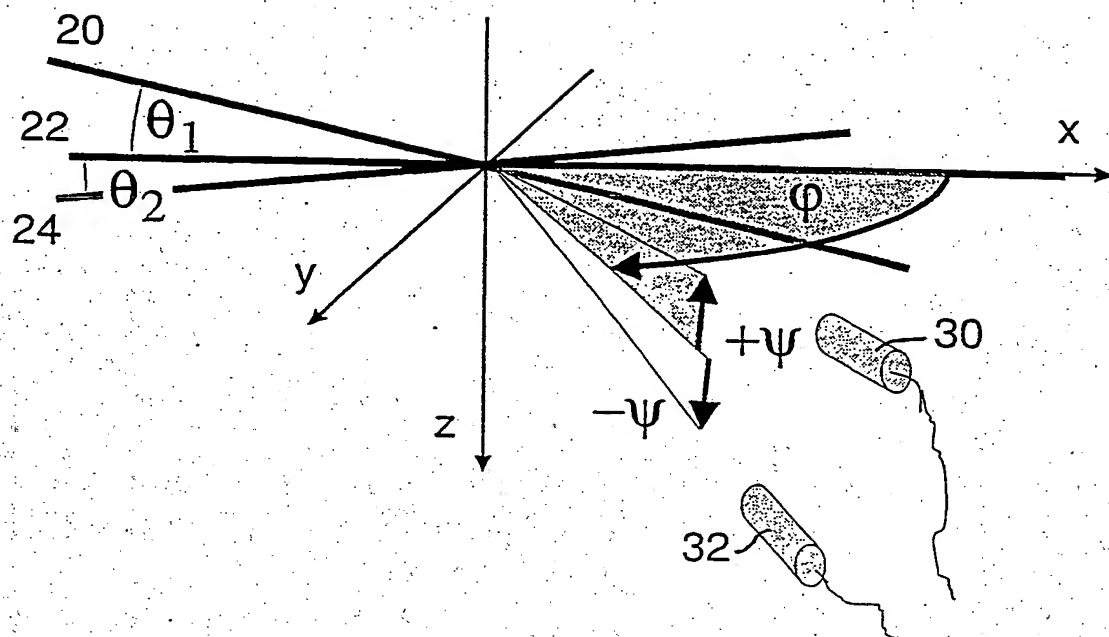


Fig. 1a

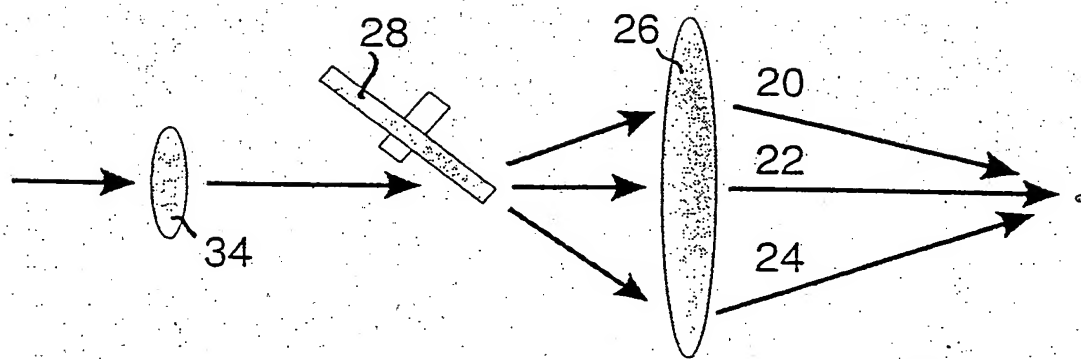


Fig. 1b

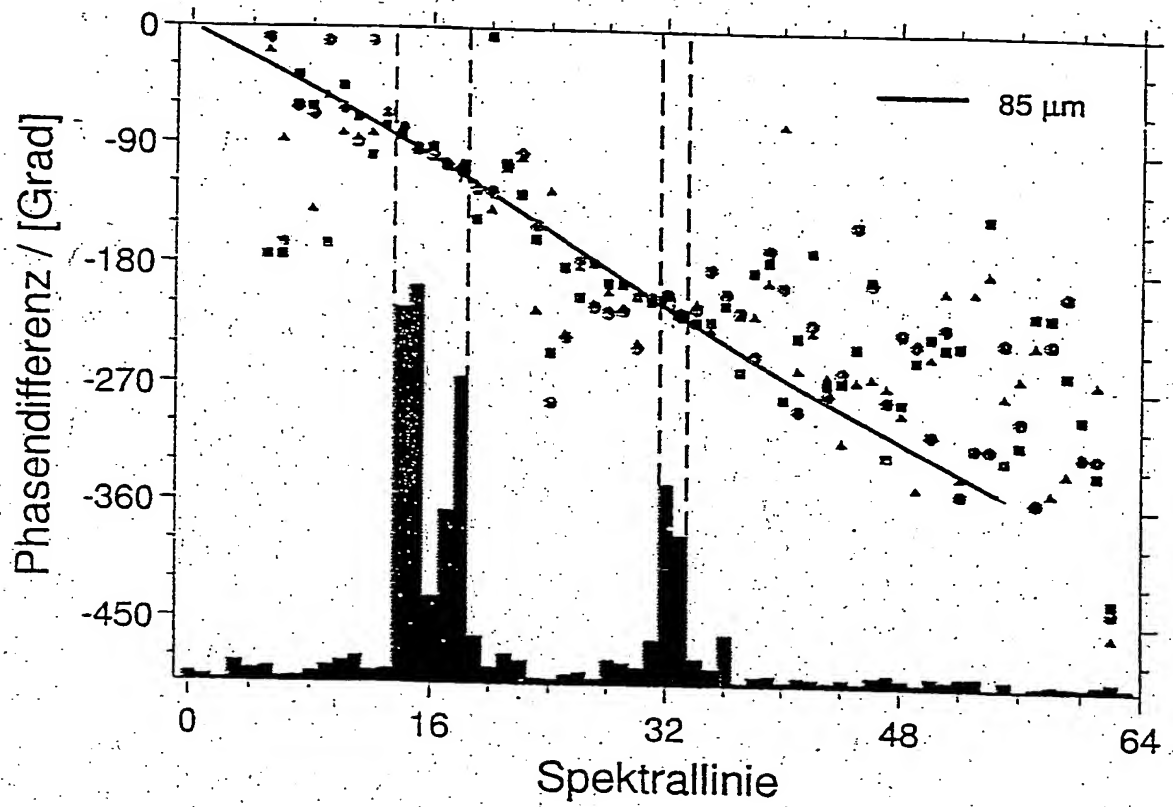


FIG. 2

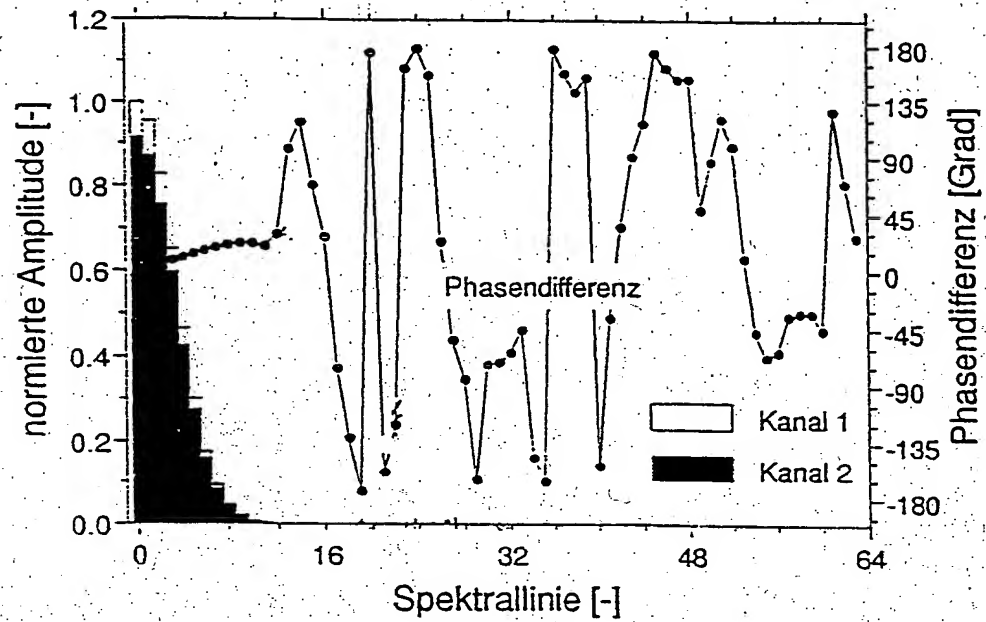


Fig. 3